

## Patent Abstracts of Japan

PUBLICATION NUMBER : 07075893  
PUBLICATION DATE : 20-03-95

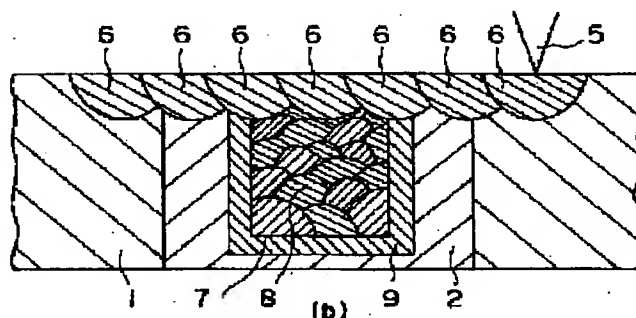
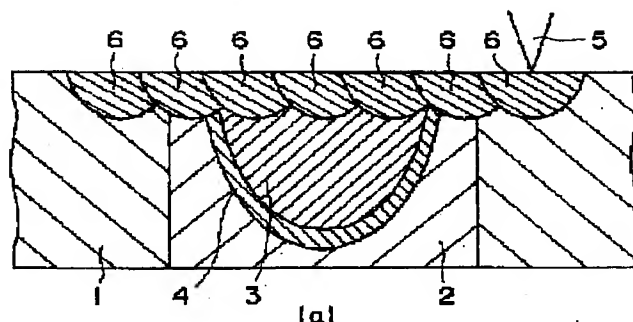
APPLICATION DATE : 03-09-93  
APPLICATION NUMBER : 05220239

APPLICANT : HITACHI LTD;

INVENTOR : TSUJIMURA HIROSHI;

INT.CL. : B23K 31/00 B23K 26/00

TITLE : METHOD FOR REPAIRING  
STRUCTURE AND PREVENTIVE  
MAINTENANCE METHOD



**ABSTRACT :** **PURPOSE:** To provide a repairing method where through damages due to the propagation of cracking caused in a structure and equipment can be prevented, and subsequent cracking are difficult to be caused in the repaired part.

**CONSTITUTION:** In a repairing method of a structure 1 where crack-shaped defects are present, the first process where the thermal energy is applied in the region 3 in which defects of the structure 1 are caused and the region is solidified after it is melted, and the second process where the thermal energy is given in the surface part of the region 3, and after the surface part 6 of the region 3 is re-melted, the re-melted part is solidified at the cooling speed to form the dendrite of  $\geq 0.1\mu\text{m}$  to  $\leq 3.0\mu\text{m}$  in size are provided. This constitution repairs the defects, and at the same time, prevents the stress corrosion cracking sensitivity of the repaired part from being increased, and prevents the stress corrosion cracking from being caused by the secular deterioration after repairing.

**COPYRIGHT:** (C)1995,JPO

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平7-75893

(43) 公開日 平成7年(1995)3月20日

(51) IntCl<sup>6</sup>

B 2 3 K 31/00  
26/00

識別記号

D  
E

庁内整理番号

F I

技術表示箇所

審査請求 未請求 請求項の数11 O L (全 19 頁)

(21) 出願番号 特願平5-220239

(22) 出願日 平成5年(1993)9月3日

(71) 出願人 000005108

株式会社日立製作所  
東京都千代田区神田駿河台四丁目6番地

(72) 発明者 浦城 慶一

茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株式会社日立製作所日立研究所内

(72) 発明者 加藤 隆彦

茨城県日立市幸町三丁目1番1号 株式会社日立製作所日立工場内

(72) 発明者 黒沢 孝一

茨城県日立市幸町三丁目1番1号 株式会社日立製作所日立工場内

(74) 代理人 弁理士 富田 和子

最終頁に続く

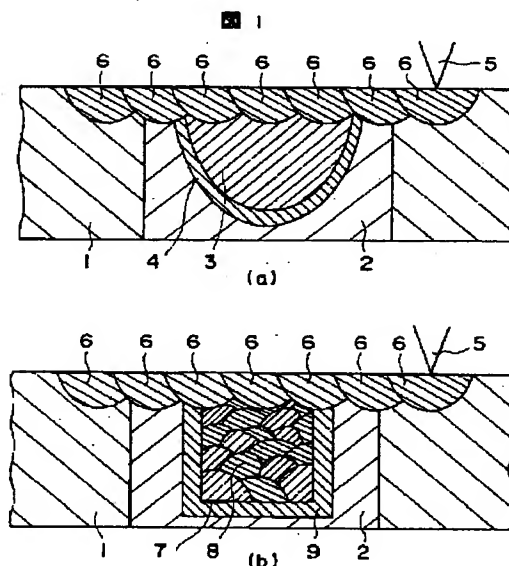
(54) 【発明の名称】 構造物の補修方法および予防保全方法

(57) 【要約】

【目的】 構造物や機器に発生した亀裂の進展による貫通損傷を防止でき、かつ、その後も補修部分に割れが発生しにくい補修方法を提供する

【構成】 亀裂状の欠陥が存在する構造物1の補修方法であって、構造物1の欠陥が生じている領域3に熱エネルギーを投入して、領域3を熔融した後、凝固させる第1の工程と、領域3の表面部に熱エネルギーを投入し、領域3の表面部6を再熔融した後、 $0.1\mu\text{m}$ 以上 $3.0\mu\text{m}$ 以下の大きさの樹枝状結晶が形成される冷却速度で凝固させる第2の工程とを施す。

【効果】 欠陥を補修するとともに、補修した部分の応力腐食割れ感受性が高くなるのを防ぎ、補修後、経年劣化により応力腐食割れが生じるのを防止することができる。



1

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】亀裂状の欠陥が存在する構造物の補修方法であって、

前記構造物の前記欠陥が生じている領域に熱エネルギーを投入して、前記領域を溶融した後、凝固させる第1の工程と、

前記領域の表面部に熱エネルギーを投入し、前記領域の表面部を再溶融した後、 $0.1\mu\text{m}$ 以上 $3.0\mu\text{m}$ 以下の大きさの樹枝状結晶が形成される冷却速度で凝固させる第2の工程とを有することを特徴とする構造物の補修方法。

【請求項2】亀裂状の欠陥が存在する構造物の補修方法であって、

前記構造物の前記欠陥を含む領域を取り除き凹部を形成した後、前記構造物を構成する材料に含まれる元素を少なくとも一部含む材料による肉盛溶接で前記凹部を充填する第1の工程と、

前記領域の表面部にエネルギーを投入し、前記領域の表面部を再溶融した後、 $0.1\mu\text{m}$ 以上 $3.0\mu\text{m}$ 以下の大きさの樹枝状結晶が形成される冷却速度で凝固させる第2の工程とを有することを特徴とする構造物の補修方法。

【請求項3】請求項1または2において、前記第2の工程において、凝固時の冷却速度は、 $10^3\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ 以上 $10^7\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ 以下であることを特徴とする構造物の補修方法。

【請求項4】請求項1または2において、前記第2の工程において、前記領域の表面部に投入するエネルギーを $0.1\text{ J}/\text{mm}$ 以上 $100\text{ J}/\text{mm}$ 以下の範囲に制御することを特徴とする構造物の補修方法。

【請求項5】請求項1または2において、前記構造物に照射脆化が生じている場合、

前記第1の工程を施す前に、前記第1の工程で処理する領域を含む領域について、照射脆化を回復させるために、前記構造物を構成する材料の溶体化温度以下に加熱して熱処理を施すことを特徴とする構造物の補修方法。

【請求項6】請求項5において、前記構造物を構成する材料が、含有量 $0.02\text{ wt}\%$ 以上の割合で炭素を含む鉄合金または含有量 $0.02\text{ wt}\%$ 以上の割合で炭素を含むニッケル合金である場合、前記熱処理を、 $500^\circ\text{C}$ 以下、または、 $800^\circ\text{C}$ 以上の温度で行うことを特徴とする構造物の補修方法。

【請求項7】請求項6において、前記照射脆化を回復させる熱処理を施した領域と、前記第2の工程で前記樹枝状結晶を形成した領域との間の領域であって、前記構造物の表面に位置する領域を、前記構造物を構成する材料の溶体化温度以上融点以下に加熱した後凝固させて溶体化する第3の工程を有することを特徴とする構造物の補修方法。

【請求項8】請求項1において、前記第1の工程におい

2

て、前記熱エネルギーは、入熱量 $1\times 10\text{ J}/\text{mm}$ 以上 $5\times 10^3\text{ J}/\text{mm}$ 、かつ、密度 $1\times 10^4\text{ W}/\text{mm}^2$ 以上 $1\times 10^7\text{ W}/\text{mm}^2$ 以下であることを特徴とする構造物の補修方法。

【請求項9】照射脆化が生じている構造物の予防保全方法であって、

前記構造物の照射脆化が生じている領域を、前記構造物を構成する材料の溶体化温度以下の温度に加熱して熱処理を施す第1の工程と、

前記領域の表面部にエネルギーを投入し、前記領域の表面部を再溶融した後、 $0.1\mu\text{m}$ 以上 $3.0\mu\text{m}$ 以下の大きさの樹枝状結晶が形成される冷却速度で凝固させる第2の工程とを有することを特徴とする構造物の予防保全方法。

【請求項10】原子炉炉内の構造物であって、

表面から深さ方向に形成された一旦溶融した後凝固した領域と、前記領域の表面部に形成された表面改質層とを有し、

前記表面改質層は、 $0.1\mu\text{m}$ 以上 $3.0\mu\text{m}$ 以下の大きさの樹枝状結晶から構成されていることを特徴とする原子炉炉内の構造物。

【請求項11】請求項10において、前記構造物は、溶体化温度以下の温度で熱処理された熱処理領域を有し、前記溶融凝固した領域は、前記熱処理領域内に含まれていることを特徴とする原子炉炉内の構造物。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、原子炉炉内に配置された構造物の割れによる事故防止及び機器の長寿命化を目的とした構造物の補修方法および予防保全方法に係り、特に、応力腐食割れあるいは疲労破壊に対する構造物の補修方法および予防保全方法に関する。

【0002】

【従来の技術】軽水炉炉内構造物などのような応力腐食環境あるいは振動等の環境下にある構造物は、原子炉の長期間の稼働運転中に応力腐食や疲労などにより、割れが発生したり、亀裂が進展する恐れがあり、その対策が検討されている。

【0003】例えば、構造物の応力腐食割れは、構造物を構成する材料側の劣化因子、応力因子、環境因子の3因子の重畳効果によって発生、進展するとされている。材料側の劣化因子は、溶接時の熱影響等に起因する低温鋭敏化などの劣化や、放射線照射による材料の内部組織変化及び局所的な組成変化等に起因する照射劣化に代表される。応力因子には、構造物を溶接する時に負荷される引張残留応力などがある。また、環境因子には、高温高圧水腐食環境などがある。

【0004】この応力腐食割れが、構造物や機器を貫通すると、プラントの重大な事故につながる恐れがあり、割れ貫通の防止技術が求められている。

3

【0005】発生した亀裂等の欠陥を進展、貫通に至る前に補修する方法として、大きな割れに対しては局部的に割れを除去した後、フィラーで材料を供給しながらレーザやティグ(TIG, tungsten-insert gas)アーク等で肉盛する手法や、小さな割れに対してはノンフィラーTIGアークなどで割れ発生部を溶融し、亀裂等の欠陥を消失させる手法が知られている。例えば、特開平3-142085号公報では、レーザによる肉盛溶接が公開されている。特開平3-169494号公報では、レーザで欠陥部を溶融する方法が公開されている。

【0006】また、割れの発生していない段階における応力腐食割れ等の感受性を有する熱敏感化部のような領域に対する割れ発生防止の予防保全技術としては、例えば特開昭60-165323号、特開昭61-52315号、特開昭61-96025号、特開昭61-177325号、特開昭63-53210号公報、特開平4-214822号公報に記載されているように、当該領域にレーザ光などを照射して表面を溶体化温度以上に加熱後冷却する表面改質手法が知られている。さらに、500 $\mu$ m以下程度の微小な割れの存在する構造物に対しては、特開平5-65530号公報において知られているように、割れを含む当該領域にレーザ光などを照射して表面を溶融後冷却する表面改質手法により亀裂状欠陥を消失させると同時に、耐食性、耐応力腐食割れ性の良好な表面層を付与する手法が知られている。

【0007】また、特開昭59-163094号公報には、耐熱耐食合金鋼材を溶接する際に、溶接によって生じるクラックを防止するため、表層をプラズマアークで再溶融する方法が開示されている。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】このような従来技術による原子炉炉内構造物及び機器の補修方法は、2つの問題点を有している。

【0009】問題点の1つは、従来技術による補修方法においては、補修した部分に、鋭敏化や耐食性劣化、引張り残留応力の発生などが生じてしまい、その結果、補修した部分の応力腐食割れ感受性が増加してしまうということである。

【0010】従来のTIGアークによる溶融補修施工では、施工部の溶融面積が狭かつ深い溶け込みのいわゆるキーホール型の溶融部を形成することが困難であり、割れ発生部を溶融消去するとその周辺部の広い領域まで溶融される。この溶融凝固部には、不純物元素の凝固偏析、凝固時の熱収縮による引張残留応力などの劣化因子が発生し、施工部の応力腐食割れ感受性が高くなってしまう。また、溶融部の周辺には、熱伝導により融点よりも低い温度に加熱された領域が生じる。この領域は、この加熱によりCr炭化物の析出が生じ、鋭敏化される。また、溶融部の凝固時の熱収縮による引張残留応力が、周辺の領域にも及ぶ。

4

【0011】従って、従来の補修技術では、存在していた欠陥は消失できても、補修により、溶融部およびその周辺に劣化因子が生じてしまうため、その後の材料の経年劣化が加速されて補修部に新たな応力腐食割れ等の欠陥が発生してしまう。この問題は、割れを除去した後にレーザやアークによって肉盛溶接した場合についても同様に発生する。従って、当該構造物を含むプラントの長寿命化を考慮した場合、発生した割れの進展は防止できても、また新たな割れが発生してしまう可能性が高い。

10 【0012】一方、従来の小入熱のレーザ光の照射による表面改質方法は、基本的には割れの発生していない部分に対する予防保全施工であり、500 $\mu$ m程度以下の深さを有する微小な割れを除いて、割れを補修することができないため、割れが発生している部分には適用できなかった。また、特開昭59-163094号公報に記載されている溶接後に表層をアークで再溶融する方法は、クラック以外の劣化因子について考慮されておらず、そのためこの方法で、応力腐食割れ感受性の増加を防ぐことはできない。

20 【0013】もう1つの問題点は、従来の補修方法が、施工対象となる部材が中性子照射によって照射脆化している場合には、適していないことである。原子炉炉内構造物には $2 \times 10^{21}$  n/cm<sup>2</sup> (中性子エネルギー>0.1 MeV) あるいは $4 \times 10^{21}$  n/cm<sup>2</sup> (中性子エネルギー>1 MeV) 以上の高い線量の中性子照射(約4dpa以上)を受けている構造物がある。このような部分に上記従来技術を適用すると凝固時の熱収縮による引張応力のため補修施工部あるいはその周辺部に割れが発生する可能性があり、さらに材料の経年劣化により割れが進展してしまうという問題があった。

30 【0014】本発明の第1の目的は、上記の従来技術の問題点を鑑み、構造物や機器に発生した亀裂の進展による貫通損傷を防止でき、かつ、その後も補修部分に割れが発生しにくい補修方法を提供することにある。

【0015】本発明の第2の目的は、中性子照射を受けた構造物や機器に発生した亀裂の進展による貫通損傷を防止でき、かつ、その後も補修部分に割れが発生しにくい補修施工方法を提供することにある。

【0016】

40 【課題を解決するための手段】上記第1の目的を達成するために本発明では、構造物の欠陥が生じている領域に熱エネルギーを投入して、前記領域を溶融した後凝固させる第1の工程と、前記領域の表面部にエネルギーを投入し、前記領域の表面部を再溶融した後、0.1 $\mu$ m以上3.0 $\mu$ m以下の大きさの樹枝状結晶が形成される冷却速度で凝固させる第2の工程とを施すことにより亀裂状の欠陥が存在する構造物を補修する。

50 【0017】また、上記第2の目的を達成するために、本発明では、前記構造物に照射脆化が生じている場合、前記第1の工程を施す前に、前記第1の工程で処理する

領域を含む領域について、照射脆化を回復させるために、前記構造物を構成する材料の溶体化温度以下に加熱する熱処理を施す。

【0018】また、本発明の補修方法または予防保全方法を適用することができる構造物としては、原子炉圧力容器やその内部の炉内構造物、例えばICMハウジング、CRDスタブチューブ、CRDハウジング、アクセスホールカバー、シュラウドサポート、シュラウド、上部格子板、炉心支持板、炉心スプレイ配管、炉心スプレイスパーチャ、ジェットポンプライザブレース、ジェットポンプ計測管、ジェットポンプディフューザ、ジェットポンプノズルセーフエンド/サマルスリーブ及びその溶接部などがある。

【0019】

【作用】まず、中性子照射による脆化が生じていない構造物に対する本発明の補修方法の施工の作用を述べる。

【0020】炭素含有量の高いステンレス鋼やインコネルなどのFe基あるいはNi基合金製の溶接構造物1において、図2に示すように溶接熱影響部に割れ等の欠陥10が発生している場合を想定すると、欠陥10の周囲の領域には溶接熱影響によってCr炭化物が析出している。このような部位に補修施工を施す場合、図3

(a)に示すように従来技術で欠陥が溶融ビード3内に含まれるように溶融処理を施したり、図3(b)に示すように局部的にホール7を形成して欠陥を除去した後、肉盛溶接部8でホール7を充填する肉盛溶接処理を施したりすると、どちらも入熱量が大きいため、処理部の周囲に熱影響部4及び9を形成し、上記の溶接熱影響と複合してCr炭化物の析出が加速される。

【0021】また、入熱量が大きいときには、溶融ビード3および肉盛溶接部8においてCr炭化物が析出したり、P、S、Si、Moなどのように耐食性に影響をおよぼす原子の偏析が生じる。さらに入熱量が大きい溶融処理では凝固収縮による引張残留応力が、溶融ビード3及び肉盛溶接部8、あるいは熱影響部4及び9あるいはその周辺において発生する。従って従来技術では存在していた欠陥は消失できても、その後の材料の経年劣化が加速されて補修部に新たな応力腐食割れ等の欠陥が発生してしまう。

【0022】本発明では、第1の工程として、従来と同様に欠陥を含む領域を溶融して凝固させ欠陥を消失させた後、第2の工程を施すことにより、補修後の材料の経年劣化が加速されることを防ぐ。第2の工程は、第1の工程で溶融凝固させた領域の表面部に再びエネルギーを投入して、表面部を再溶融した後、0.1μm以上3.0μm以下の大きさの樹枝状結晶から構成させる表面領域を形成されるような冷却速度で凝固させるものである。ここで、0.1μm以上3.0μm以下の大きさの樹枝状結晶とは、樹枝状結晶の幹の部分の幅が0.1μm以上3.0μm以下のものをいう。このような組織構

造の表面領域が形成されるためには、溶融状態から急冷される必要があり、図20に示すように、炭化物の析出温度に保持される時間が短くなるため、Cr炭化物の析出やP、S、Si、Moなどの原子の偏析が存在しないかあるいは極めて低く抑止される。したがって、表面領域が腐食環境下に長期間さらされても、Cr炭化物の析出や原子の偏析による経年劣化は抑止される。また、第1の工程で形成された領域の内部部分は、表面領域が破壊されないかぎり、腐食環境下には接触しないため、経年劣化は生じない。

【0023】さらに、この第2の工程で表面領域を形成することによって、溶接時あるいは上記第1段階での補修施工時に発生している引張残留応力は大きく低減される。したがって、第2の工程の施工によって当該部の引張り残留応力因子による経年劣化は抑止される。

【0024】次に、中性子照射による照射脆化が生じている構造物に対する本発明の補修方法の施工の作用を述べる。

【0025】ステンレス鋼やインコネルなどのFe基あるいはNi基合金等に中性子が照射されたとき、中性子と構成原子の相互作用によって構成原子が熱力学的平衡状態で安定な格子点位置からはじきだされ、元の格子点位置は原子空孔となり、はじきだされた原子と原子空孔からなる一対の欠陥が形成される。ここで $2 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  (中性子エネルギー $> 0.1 \text{ MeV}$ )あるいは $4 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  (中性子エネルギー $> 1 \text{ MeV}$ )以上の高い線量の中性子照射(約4dpa以上)を受けているステンレス鋼やインコネルなどのFe基あるいはNi基合金等の構造物では上記の欠陥が多数存在している。このような材料は引張応力が加わって変形しようとするとき、結晶粒内において上記欠陥と転位との相互作用によって転位の移動が阻止され、結晶粒内での塑性変形は著しく阻害される。従って、加わる引張応力が材料の塑性変形を促すような大きさ(降伏点以上)になったとき、材料は結晶粒の変形が阻害されているため、応力を開放するために結晶粒界で割れ破壊が生じやすくなる。これが中性子照射による材料の照射脆化である。

【0026】従って、図4のように、構造物の照射脆化した領域12に亀裂状の欠陥10が生じている場合、図5(a)のように本発明の第1の工程や従来技術で溶融ビード3を形成したり、図5(b)に示すように、従来技術でホール7を形成して肉盛溶接部6を形成すると、必然的に凝固時に生じる凝固収縮によって応力が発生し、この応力は材料の降伏点以上に達する場合が多い。この応力によって溶融部周囲の脆化している部分、特に熱影響部4及び9において、割れが発生する可能性が高くなり、存在する割れを溶融処理によって消失させてもその周囲に新たな割れが発生して応力腐食割れ環境下で割れが進展して事故に至る危険性が大きい。

【0027】そこで、本発明では、構造物が照射脆化し

ている場合、第1の工程を施す前に、第1の工程を施す領域を含む領域について、照射によって形成された欠陥を消去せしめ、照射脆化を回復させるための熱処理を行う。具体的には、構造物の溶体化温度以下の温度で熱処理を行う。照射脆化を回復させるための熱処理を行った領域に第1の工程および第2の工程を施すことにより、第1の工程で結晶粒界で割れが生じることを防止し、かつ、補修後の経年劣化を防いだ補修を行うことができる。

【0028】

【実施例】以下に本発明の実施例を図面に基づいて説明する。

【0029】本発明の実施例1から実施例4により、原子炉炉内の構造物であって、中性子照射による照射脆化の影響を考慮する必要が無い構造物に、応力腐食割れ等によって発生した亀裂状の欠陥を補修する方法について説明する。

【0030】この構造物の構成を図2を用いて説明する。構造物1は、炭素含有量が0.02wt%以上であるオーステナイト系ステンレス鋼などのFe基合金あるいはインコネルなどのNi基合金製である。亀裂状の欠陥10が存在している領域2は、溶接熱影響部などで材料の結晶粒界にCr炭化物が析出しているが、あるいは中性子照射の影響で粒界でのCr濃度が局部的に低下し、鋭敏化している。構造物1が受けた中性子の照射量は、 $2 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  (中性子エネルギー>0.1 MeV) 以下あるいは $4 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  (中性子エネルギー>1 MeV) 以下の低い線量の中性子照射 (約4dpa以上) であり、照射脆化の影響は無視することができる。亀裂状の欠陥10の長さは、500 $\mu\text{m}$ 以上である。

【0031】(実施例1) まず、本発明の第1の実施例として、溶融処理と表面処理とを含んだ2段階の処理により欠陥10を補修する方法について説明する。

【0032】まず、亀裂状の欠陥10の大きさや形状を把握するために超音波あるいはX線等による非破壊探傷検査を実施する。これにより、亀裂状の欠陥10の大きさや形状を把握した後、図3(a)に示すように、レーザ光あるいはアークなどのエネルギー5を投入して、欠陥10が溶融ビード3内に含まれるように溶融処理を施し欠陥10を消失させる。欠陥10が完全に溶融したら、エネルギー5の投入を停止し、溶融ビード3を凝固させる。これを第1段階とする。ただし、構造物1の領域2が軽水炉の炉内構造物のように水環境に接しており、酸化皮膜等が付着している場合は、エネルギー5を投入する前に、水を抜き、前処理として、ワイヤブラシやグラインダー等で領域2の表面に付着している皮膜等の不純物を除去しておく。これにより、溶融処理時に不純物が混入することを防止できる。

【0033】エネルギー5により、投入される入熱量は

対象となる構造物の板厚や形状、あるいは発生している欠陥の大きさに応じて調節する。また、この段階での熱エネルギー投入はできるだけ小熱が望ましいが、後に第2段階での表面処理を施すため、従来のように、大熱を投入してもよい。この第1段階の亀裂消失工程によって、存在していた欠陥10の進展を止めることができ、欠陥10が構造物1を貫通することによる応力腐食割れ等の割れ破壊、あるいはプラントの水漏れ等の事故を防止することが可能である。

10 【0034】なお、この溶融処理による第1段階の状態では溶融ビード3の周囲の熱影響部4が生じる。この熱影響部4は、鋭敏化された領域2内に存在するため、鋭敏化と第1段階の処理で受けた熱が複合して、Cr炭化物の析出が加速される。また、溶融ビード3においても、Cr炭化物の核形成やP, S, Si, Moなどの原子が偏析している。さらに、溶融ビード3が凝固する際の収縮により、引っ張り応力が溶融ビード3及び熱影響部4に発生する。そのため、このままでは補修後の経年劣化の原因となる。

20 【0035】そこで第2段階として、図1(a)に示すように溶融ビード3及びその熱影響部4を含む領域、あるいは溶接熱影響部2全体を含む領域の表面に、再びレーザ光あるいはアークなどのエネルギー5を投入して、表面部を材料の融点以上に加熱しつつ、エネルギー源を移動させて、材料の自己冷却による急冷効果によって表面部に急冷凝固スポット6が一部重なりあった層を形成させる。具体的には、図21のように、形成された急冷凝固スポット6が一部重なるようにパルス状のエネルギー5を移動させながら投入することによって、当該領域に渡った表面改質層を形成する処理を行う。重なる幅は急冷凝固スポット6の幅の $1/4 \sim 1/2$ が適当である。また、この時のエネルギー5の投入に当たって、図17に示すように入熱量を0.1~100J/mmの範囲に制御することにより、厚さ6mmから38mm程度の通常の原子炉炉内構造物は、自己冷却により冷却速度 $10^3 \text{ } ^\circ\text{C/s} \sim 10^7 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ の範囲で急冷される。この場合、急冷凝固スポット6は、樹枝状結晶で構成され、樹枝状結晶の幹の部分の幅は、0.1~3.0 $\mu\text{m}$ の範囲となる。以下、樹枝状結晶の幹の部分の幅をセル間隔と呼ぶ。

40 【0036】このような条件を満たすように急冷した場合、図20に示したように、炭化物析出温度に保持される時間が短くなるため、急冷凝固スポット6およびスポット6の周辺の熱影響部に析出核が形成されないかまたは形成される頻度が極めて小さい。そのため、Cr炭化物の析出やP, S, Si, Moなどの原子の偏析が存在しないかあるいは極めて低く抑止された5~500 $\mu\text{m}$ の表面改質層が形成される。したがって、表面改質部には、経年劣化を生じせしめるだけのCr炭化物やP, S, Si, Moなどの原子の偏析が存在しないため、補



修後に低温鋭敏化条件におかれても、粒界腐食は発生しない。さらに、この表面改質によって溶接熱影響あるいは第1段階の亀裂を溶融する処理で生じた引張残留応力を低減させることができる。

【0037】以上のように2段階の工程を含んだ補修を施すことによって、亀裂進展による事故を防止し、かつ補修後の経年劣化による応力腐食割れ等の亀裂発生を抑止し、構造物の健全性を長期化させることが可能である。また、この2つの段階以外の工程を含めることももちろん可能である。

【0038】上述の第1段階と第2段階のエネルギーを投入する際に、第1段階ではアーク、第2段階ではレーザというように異なったエネルギー源を用いてもよいが、第1及び第2段階ともに同じレーザを用いて、第1段階では入熱量大、第2段階では図17に示す入熱範囲というように照射条件を変化させれば、一連の施工手順が簡略化し、補修時間が短縮化され、より効率的である。

【0039】本実施例では、第2段階において、パルス状のエネルギー5を図21のように線状に移動させながら、表面改質部6を形成したが、以下のように急冷凝固スポット6を形成することにより隣接する急冷凝固スポット6間の熱影響を低減することができ、Cr炭化物の析出や原子の偏析頻度をさらに低減することが可能である。具体的には、エネルギー5を線状に移動させずに、図22のように、(n-1)回目のパルスで形成した急冷凝固スポット6と、n回目のパルスで形成した急冷凝固スポット6と、(n+1)回目のパルスで形成した急冷凝固スポット6とが、互いに重ならないように、パルス状のエネルギー5を改質すべき領域内で動かし、最終的に図1(a)のように急冷凝固スポット6が重なりあった表面改質層を形成する。このようにパルス状のエネルギー5を移動させることにより、完全に凝固した急冷凝固スポット6に隣のスポン6が重なるため、熱影響が低減される。

【0040】また、実施例1では、第2段階において、エネルギー5の入熱量を0.1~100J/mmの範囲に制御することにより、構造物1の自己冷却で冷却速度を10<sup>3</sup>℃/s~10<sup>7</sup>℃/sに制御したが、構造物によっては、入熱量を上記範囲に制御しても冷却速度が10<sup>3</sup>℃/s~10<sup>7</sup>℃/sの範囲に入らない可能性がある。この場合には、構造物1を裏面側から水または液体窒素で冷却しながら、急冷凝固スポット6を形成することで、冷却速度を上記範囲にすることができる。この場合、冷却速度が上記範囲に入っているかどうかは、急冷凝固スポット6のセル組織を観察することで確認できる。セル間隔が0.1~3.0μmの範囲内に入っているれば、上記冷却速度が達成されている。

【0041】また、第2段階で投入するエネルギー5は、必ずしもパルス状である必要はなく、連続したエネ

ルギーを用いることももちろん可能である。連続したエネルギーを用いる場合には、入熱量を0.1~100J/mmの範囲に制御し、エネルギー源を線状に移動させることにより、急冷凝固された表面改質層を形成することができる。

【0042】さらに、第2段階において、エネルギー5により表面部を溶融させる代わりに、材料の溶体化温度以上融点以下に加熱しつつ、材料の自己冷却による急冷効果によって表面部に溶体化層を形成させても有効である。

【0043】(実施例2)本発明の第2の実施例として、肉盛溶接と表面処理とを含んだ2段階の処理により、図2の欠陥10を補修する方法について説明する。

【0044】本実施例も実施例1と同様に、図2のように構造物1の鋭敏化している領域2において応力腐食割れ等によって500μm以上の亀裂状の欠陥10が存在する状態が初期状態である。

【0045】まず、実施例1と同様に欠陥10の大きさや形状を把握するために超音波あるいはX線による非破壊探傷検査を実施する。次に、欠陥10の大きさや形状を把握した後、図3(b)に示すように、ドリル等の機械切削あるいは放電加工等の方法によって欠陥10を含む部分に、局部的にホール7を形成して欠陥10を除去する。

【0046】次にフィラー状の溶加材11を供給しつつレーザ光あるいはアークなどのエネルギー5を投入して溶加材11を溶融させ、上記ホール7を溶融凝固した溶加材からなる肉盛溶接金属で充填し、肉盛溶接部8を形成させる。溶加材11の成分は、オーステナイト系ステンレス鋼の場合、SUS308L、SUS316L等で炭素含有量が0.02wt%以下であることが望ましい。また、対象部位が軽水炉の炉内構造物のように水環境に接しており、酸化皮膜等が付着している場合は、溶融凝固時での不純物の混入を防止するため、欠陥除去処理する前に前処理として、ワイヤーブラシやグラインダー等で皮膜等の不純物を除去した後に、欠陥10の除去処理を実施する。また、この段階での熱エネルギー5の投入は大入熱を投入する従来技術でよい。

【0047】この第1段階としての欠陥10を消失させる工程によって、存在していた欠陥10が進展し構造物1を貫通することによる応力腐食割れ等の割れ破壊、あるいはプラントの水漏れ等の事故を防止することが可能である。なお、この第1段階の状態では肉盛溶接部8の周囲の熱影響部9あるいは肉盛溶接部8においてCr炭化物の核形成やP、S、Si、Moなどの原子が偏析しており、このままでは補修後の経年劣化の原因となる。

【0048】そこで第2段階として、実施例1と同様に、図1(b)に示すように肉盛溶接部8及びその熱影響部9を含む領域、あるいは溶接熱影響部2全体を含む領域の表面に、再びレーザ光あるいはアークなどのパル

ス状のエネルギー5を投入して、表面部を材料の融点以上に加熱しつつ、エネルギー源を移動させて、材料の自己冷却による急冷効果によって表面部に急冷凝固スポット6を重ねた層を形成させる。具体的には、形成された急冷凝固スポット6が一部重なるようにエネルギー5を平行移動させながら投入することによって、当該領域に渡った表面改質処理を行う。重ねる幅は急冷凝固スポット6の幅の $1/4 \sim 1/2$ が適当である。また、この時のエネルギー5の投入に当たって、実施例1と同じように入熱量を $0.1 \sim 100 \text{ J/mm}$ の範囲に制御することにより、エネルギーの投入された材料の冷却速度を $10^\circ\text{C/s} \sim 10^7^\circ\text{C/s}$ の範囲に制御する。これにより、表面溶融処理の場合平均セル間隔が $0.1 \sim 3.0 \mu\text{m}$ の範囲にあるセル組織を持つ急冷凝固組織が形成される。

【0049】このような冷却条件で急冷凝固スポット6を重ねると、実施例1で説明したように、Cr炭化物の析出やP, S, Si, Moなどの原子の偏析が存在しないかあるいは極めて低く抑止された $5 \sim 500 \mu\text{m}$ の表面改質層が形成される。この表面改質層は、補修後の経年劣化を生じせしめるだけのCr炭化物やP, S, Si, Moなどの原子の偏析が存在しないため、補修後に低温鋭敏化条件におかれても粒界腐食は発生しない。また、この表面改質によって溶接熱影響あるいは第1段階での亀裂消失処理で生じた引張残留応力を低減させることができる。

【0050】第2段階において、投入されるエネルギー5は、必ずしもパルス状である必要は無く、連続的なエネルギーによって表面改質部を形成させてもよい。

【0051】また、表面部を溶融させる代わりに、材料の溶体化温度以上融点以下に加熱しつつ、材料の自己冷却による急冷効果によって表面部に溶体化層を形成させても有効である。

【0052】以上の2段階の工程を施すことによって、亀裂進展による事故を防止し、かつ施工後の経年劣化による応力腐食割れ等の亀裂発生を抑止し、構造物の健全性を長期化させることが可能である。また、この2つの段階以外の工程を含めることももちろん可能である。

【0053】ここで、第1段階と第2段階のエネルギー投入において、第1段階ではアーク、第2段階ではレーザーというように異なったエネルギー源を用いてもよいが、第1及び第2段階ともに同じレーザーを用いて、第1段階では入熱量大、第2段階では第17図に示す入熱範囲というように照射条件を変化させれば、一連の施工手順が簡略化し、施工時間が短縮化され、より効率的である。

【0054】(実施例3) 本発明の第3の実施例として、キーホール形状の溶融ビードを形成することにより欠陥10を補修する方法について説明する。本実施例も実施例1と同様に、図2のように構造物1の鋭敏化して

いる領域2において応力腐食割れ等によって $500 \mu\text{m}$ 以上の亀裂状の欠陥10が入っている状態が初期状態である。

【0055】まず、欠陥10の大きさや形状を把握するために超音波あるいはX線等による非破壊探傷検査を実施する。

【0056】次に、欠陥10の大きさや形状を把握した後、図6(a)に示すように、焦点を領域2の表面にあわせレーザー光をエネルギー5として投入して、欠陥10がキーホール型の溶融ビード13内に含まれるように溶融処理を施し、欠陥10を消失させる。対象部位が軽水炉の炉内構造物のように水環境に接しており、酸化皮膜等が付着している場合は、溶融凝固時での不純物の混入を防止するため、エネルギーを投入する前に前処理として、水を抜き、ワイヤーブラシやグラインダー等で皮膜等の不純物を除去した後、エネルギー5の投入による溶融処理を実施する。この時投入される入熱量は対象となる構造物の板厚や形状、あるいは発生している欠陥の大きさによるが、できるだけ小入熱で深い溶け込みが得られるように調節する。

【0057】しかし、本実施例では、実施例1のように表面改質の工程を行わないので、施工後の経年劣化を抑止するに、Cr炭化物析出抑止及び引張残留応力低減の観点から、およそ入熱量は $5 \times 10^3 \text{ J/mm}$ 以下にする必要があり、かつ、同時に溶け込み深さの大きいキーホール型の溶融ビード13を形成させるためにエネルギーの出力密度を高くする必要がある。低入熱かつ高出力密度のレーザー光を照射することによって、溶融プール内に形成されたキャビティ内にプラズマおよび金属蒸気が発生し、キャビティ内の重力、表面張力、蒸気圧のバランスにより溶融幅が小さく、かつ、溶け込み深さの大きいキーホール型の溶融ビード13が形成される。

【0058】具体的には、本実施例において亀裂深さが $0.5 \sim 2.0 \text{ mm}$ の範囲とした場合、図18に示すように、出力密度を $10^4 \sim 10^7 \text{ W/mm}^2$ かつ入熱量を $1 \times 10^1 \sim 5 \times 10^3 \text{ J/mm}$ の範囲に制御する。この制御範囲においては、自己冷却による冷却速度が速いため、Cr炭化物の析出やP, S, Si, Moなどの原子の偏析が存在しないかあるいは極めて低く抑止され、補修後の経年劣化を防止することができる。

【0059】また、上記の入熱制御範囲では消失し切れない大きさの欠陥に対しては、(1)入熱量を大きくして実施例1のように第2段階として表面改質処理を施す一連の工程とするか、あるいは(2)亀裂先端部を残存したまま亀裂の入り口を封じ込める処理とする(実施例4にて詳述する)ことによって構造物の健全性は長期化される。また、上記の入熱制御範囲の施工であっても安全性をさらに高める観点から、第2段階として実施例1で述べた表面改質処理を施す一連の工程とすることによって構造物の健全性はさらに長期化される。



13

【0060】以上の工程を施すことによって、亀裂進展による事故を防止し、かつ施工後の経年劣化による応力腐食割れ等の亀裂発生を抑制し、構造物の健全性を長期化させることが可能である。

【0061】（実施例4）本発明の第4の実施例として、欠陥10の先端部を残したまま、欠陥の入口を封じ込めることにより、欠陥10を補修する方法について説明する。本実施例も実施例1と同様に、図2のように鋭敏化している領域2において応力腐食割れ等によって500 $\mu$ m以上の亀裂状の欠陥10が入っている状態が初期状態である。

【0062】まず、欠陥10の大きさや形状を把握するために超音波あるいはX線等による探傷検査を行う。

【0063】次に、欠陥10の大きさや形状を把握した後、図7に示すように、欠陥10を含む領域、あるいは溶接熱影響部2全体を含む領域の表面にレーザ光あるいはアークなどのパルス状のエネルギー5を投入して、表面部を融点以上に加熱したのち、自己冷却により急冷し、欠陥10の入り口が封じ込められるように表面溶融処理を施す。エネルギー5の投入に当たって、実施例1の第2段階と同様に、入熱量を0.1~100J/mmの範囲に制御することにより、エネルギーの投入された材料の冷却速度を10 $^3$ ℃/s~10 $^7$ ℃/sの範囲に制御する。これにより、平均セル間隔が0.1~3.0 $\mu$ mの範囲にあるセル組織を持つ急冷凝固組織を形成される。

【0064】この制御範囲のときにCr炭化物の析出やP, S, Si, Moなどの原子の偏析が存在しないかあるいは極めて低く抑止された深さ5~500 $\mu$ mの急冷凝固スポット6が重なった表面改質層が形成される。

【0065】応力腐食割れによる亀裂上の欠陥の進展は、構造物が水環境に接している場合には、欠陥の先端において引っ張り応力による皮膜破壊と金属の水環境への溶解が繰り返されて生じる現象である。従って、本実施例では欠陥10の入口を封じ込められるため、欠陥10の先端部はもはや原子炉の炉水とは接しないため、欠陥10の先端が炉水に溶解することはない、欠陥10の進展を止めることができる。したがって、欠陥10が構造物1を貫通する事故が防止でき、かつ、施工後の経年劣化による応力腐食割れ等の亀裂発生を抑制し、構造物の健全性を長期化させることが可能である。

【0066】また、エネルギー5投入は、必ずしもパルスある必要は無く、連続したレーザの照射によって、表面改質層を形成させてもよい。この表面改質層6は、施工後の経年劣化を生じせしめるだけのCr炭化物やP, S, Si, Moなどの原子の偏析が存在しない。さらに、この表面改質によって溶接熱影響で生じた引張残留応力を低減させることができる。

【0067】また、エネルギー5を投入する際には、実施例1で述べたように、構造物1を裏面から水や液体窒

14

素で冷却することにより、冷却速度を上述の範囲内に制御する方法を用いることももちろん可能である。

【0068】次に、実施例5から10により、原子炉内の構造物であって、中性子照射による照射脆化の影響を考慮する必要がある構造物について、応力腐食割れ等によって亀裂が発生するまえに表面改質を行い予防保全する方法と、応力腐食割れ等によって発生した亀裂状の欠陥を補修する方法について説明する。

【0069】この構造物の構成を図8を用いて説明する。構造物は、炭素含有量が0.02wt%以上であるオーステナイト系ステンレス鋼などのFe基合金あるいはインコネルなどのNi基合金製である。この構造物の領域12は、溶接熱影響部などであり、中性子照射による材料の脆化及び結晶粒界でのCr欠乏が生じており、かつ、溶接熱影響によって材料の結晶粒界にCr炭化物が析出してCr濃度が低下し、鋭敏化している。構造物が受けた中性子の照射量は、 $2 \times 10^{21}$  n/cm $^2$ （中性子エネルギー>0.1MeV）あるいは $4 \times 10^{21}$  n/cm $^2$ （中性子エネルギー>1MeV）以上の高い線量の中性子照射（約4dpa以上）である。

【0070】ステンレス鋼やインコネルなどのFe基あるいはNi基合金に中性子が照射されると、中性子と構成原子の相互作用によって構成原子が熱力学的平衡状態で安定な格子点位置からはじきだされ、元の格子点位置は原子空孔となり、はじきだされた原子と原子空孔からなる一対の欠陥が形成される。 $2 \times 10^{21}$  n/cm $^2$ （中性子エネルギー>0.1MeV）あるいは $4 \times 10^{21}$  n/cm $^2$ （中性子エネルギー>1MeV）以上の高い線量の中性子照射（約4dpa以上）を受けているステンレス鋼やインコネルなどのFe基あるいはNi基合金の構造物では上記の欠陥が多数存在している。

【0071】このような構造物は、引張応力が加わって変形しようとするとき、結晶粒内において上記欠陥と転位との相互作用によって転位の移動が阻止され、結晶粒内での塑性変形は著しく阻害される。従って、加わる引張応力が材料の塑性変形を促すような大きさ（降伏点以上）になったとき、材料は結晶粒の変形が阻害されているため、応力を開放するために結晶粒界で割れ破壊が生じやすくなる。これが中性子照射による材料の照射脆化である。

【0072】このような構造物に実施例1~4で説明したような溶融熱処理を施すと、凝固時に生じる凝固収縮によって応力が発生し、この応力は材料の降伏点以上に達する場合が多い。この応力によって溶融部周囲の脆化している部分、特に熱影響部において、割れが発生する可能性が高くなり、存在する割れを溶融処理によって消失させてもその周囲に新たな割れが発生して応力腐食割れ環境下で割れが進展して事故に至る危険性が大きい。そのため、中性子照射による照射脆化の影響を考慮した予防保全方法ならびに補修方法が必要である。

【0073】(実施例5) 本発明の第5の実施例として、照射脆化した構造物に対する欠陥発生の予防のための保全方法を説明する。図8(a)のように領域12において鋭敏化あるいは中性子照射によるCr欠乏が生じて応力腐食割れ感受性が高くなっており、かつ中性子照射によって脆化している状態が初期状態である。

【0074】まず、第1段階として照射脆化の回復熱処理を施す。適正な熱処理条件は構造物の種類によって異なるが、本実施例ではオーステナイト系ステンレス鋼の場合(SUS304、SUS308、SUS316等) 10 について述べる。

【0075】回復熱処理の条件としては、オーステナイト系ステンレス鋼やインコネルなどの面心立方金属では、熱処理温度として約400℃以上溶体化温度(約1300℃)以下が望ましい。温度保持時間としては低温ほど長時間必要で高温では短時間の熱処理でよい。図19(a)に照射脆化を回復させるための熱処理の適正な温度-保持時間範囲を示す。しかしながら、ステンレスやインコネル等において材料の炭素含有量が0.02wt%以上と高い場合、図19(b)に示すように500 20 ~800℃の温度範囲において粒界にCr炭化物が析出し、材料が鋭敏化して耐食性が劣化する恐れがある。

【0076】補修施工の際、対象部近傍の局所的な熱処理であれば第1段階の回復熱処理で熱影響部にCr炭化物が析出して鋭敏化感受性を有することになっても、第2段階以降の表面改質等の処理によって材料表面部の耐食性は向上されることになるので問題はない。しかし、補修対象部のみならず中性子照射された広い範囲に渡った領域を回復熱処理させる場合、熱処理領域全てを表面改質処理するには膨大な施工時間を要する。従って、広い範囲に渡った領域を回復熱処理させる場合には上記の500~800℃の温度領域を避けることが望ましい。

【0077】すなわち、材料の炭素含有量が0.02wt%以上と高い場合材料の回復熱処理における適正範囲は図19(c)に示すように350~500℃で30~120minあるいは800~1300℃で0.01~30minである。一方、炭素含有量が0.02wt%以下と低い場合、500~800℃の温度範囲においても鋭敏化感受性はあまり有しないので問題はない。

【0078】これをまとめると次のようになる。

【0079】(i) 炭素含有量が0.02wt%以下の低炭素オーステナイト系ステンレス鋼の場合、鋭敏化温度を避ける必要はない。従って熱処理条件は、図19(a)に示すように400~1300℃で0.01~1.20minの領域Aが望ましい。

【0080】(ii) 炭素含有量が0.02wt%以上の高炭素オーステナイト系ステンレス鋼の場合、鋭敏化温度を避ける必要がある。従って熱処理条件は、図19(c)に示すように400~500℃で30~120minの領域Cか、あるいは800~1300℃で0.0 50

1~30minの領域Bが望ましい。

【0081】回復熱処理を施す加熱源15は、図9(a)に示すように高周波加熱装置か、あるいはレーザーを用いる。加熱源15により、回復すべき範囲を含む領域を加熱し、回復層16を形成する。回復層16の深さは、次の段階での急冷凝固スポット6の深さより大きくしておく。本実施例では、回復層16を500μm以上形成した。

【0082】次に第2段階として、図9(b)に示すように回復熱処理した回復層16の領域の表面に、再びレーザー光あるいはアークなどのエネルギー5を投入して、表面部を材料の融点以上に加熱したのち急冷し、表面部に急冷凝固スポット6を形成させる。このとき急冷凝固スポット6が照射脆化領域12に重ならないようにする。エネルギー投入する回復層16は第1段階での熱処理によって延性が回復しているので、凝固収縮等による割れは発生しない。また、この段階での入熱条件等の施工条件は実施例1での第2段階の表面改質条件と同様であるので説明を省略する。

【0083】この時、処理領域において、図10(a)に示すように表面改質施工端部と回復層端部との間が未表面処理の回復層部分17として残ることになる。対象とする構造物の炭素含有量が0.02wt%以下である場合、あるいは回復熱処理が前述したように鋭敏化領域を避けて行われた場合には未表面処理の回復層部分17が経年的に劣化することは無い。しかし、構造物の炭素含有量が0.02wt%以上である場合、かつ回復熱処理が鋭敏化領域に近いまたは冷却過程で鋭敏化領域を通過する条件で行われた場合には上記の未表面処理の回復層部分17が経年劣化する可能性がある。その場合には第3段階として次のように端部処理を施す。

【0084】図10(b)に示すように未表面処理の回復層部分17にレーザー光等のエネルギー5を投入して表面部を溶体化温度以上融点以下に加熱したのち急冷して表面溶体化層18を形成させる。融点以下の表面加熱処理であるので照射脆化領域12に重なる部分での凝固収縮による割れ等は生じず、かつ経年劣化も抑止されることになる。

【0085】第2段階での表面改質施工の際、融点以上に加熱せず表面溶体化処理とする場合には、第2段階と第3段階を一緒にして一連の施工をすることができ、第3段階は不要である。

【0086】以上の2段階(端部処理する場合には3段階)の施工を施すことによって、表面部にCr炭化物の析出や、原子の偏析が存在しないかあるいは極めて低く抑止された表面改質層が形成されるので、中性子照射によって延性の低下した構造物にたいしても、施工後の経年劣化による応力腐食割れ等の発生を抑止し、構造物の健全性を長期化させることが可能である。

【0087】ここで、第1段階と第2段階の熱処理にお

いて、第1段階では高周波加熱、第2段階ではレーザーというように異なったエネルギー源を用いてもよいが、第1及び第2段階ともに同じレーザーを用いて、第1段階では出力密度を小さくかつスポット径を大きくして表面溶体化処理条件のように施工し、第2段階では第17図に示す入熱範囲というように照射条件を変化させれば、一連の施工手順が簡略化し、施工時間が短縮化され、より効率的である。

【0088】(実施例6)本発明の第6の実施例として、構造物の照射脆化領域に存在する $500\mu\text{m}$ 以下の微小欠陥を補修する方法について説明する。図8(b)のように照射脆化領域12において鋭敏化あるいは中性子照射によるCr欠乏が生じて応力腐食割れ感受性が高くなっているとともに $500\mu\text{m}$ 以下の微小な欠陥14が存在しており、かつ中性子照射によって脆化している状態が初期状態である。

【0089】まず、欠陥の大きさや形状を把握するために超音波あるいはX線等による探傷検査を実施する。欠陥14が $500\mu\text{m}$ 以下の大きさである場合に限って、本実施例は適用可能である。

【0090】次に、実施例5と同様に、図11(a)のように、第1段階として照射脆化の回復熱処理を施して、回復層16を形成し、第2段階として、図11(b)のように、急冷凝固スポット6により表面溶融改質層を形成する。表面溶融改質層の深さは、上記の存在する欠陥14の深さより深くする。これにより、欠陥14は消失する。第1段階での熱処理条件及び第2段階での表面改質条件は実施例5と同様であるので説明を省略する。また端部処理する必要があるときは実施例5に示した端部処理を表面溶体化層18を形成する処理を施す。

【0091】以上の2段階(端部処理する場合は3段階)の施工を基本とする一連の工程を施すことによって、中性子照射によって延性の低下した構造物に対しても、微小欠陥14を消失させると同時に施工後の経年劣化による応力腐食割れ等の発生を抑止し、構造物の健全性を長期化させることが可能である。

【0092】(実施例7)次に本発明の第7の実施例として、構造物の照射脆化領域に存在する $500\mu\text{m}$ 以上の欠陥を、照射脆化の回復熱処理と欠陥の溶融処理と表面処理によって補修する方法について説明する。照射脆化領域において鋭敏化あるいは中性子照射によるCr欠乏が生じて応力腐食割れ感受性が高くなっているとともに $500\mu\text{m}$ 以上の欠陥が存在しており、かつ中性子照射によって脆化している状態が初期状態である。

【0093】まず、欠陥10の大きさや形状を把握するために超音波あるいはX線等による非破壊探傷検査を実施する。欠陥が $500\mu\text{m}$ 以下の大きさである場合には、実施例6の施工を実施すればよい。欠陥が $500\mu\text{m}$ 以上の大きさである場合には、以下に述べる施工を行

う。

【0094】まず、第1段階として照射脆化の回復熱処理を行い、図12(a)のように回復層16を形成する。熱処理条件は実施例5と同様であるが、回復層16の深さは、欠陥10近傍に対しては後の第2段階での欠陥10の消失のための溶融ビード3及び熱影響部4の深さより大きくする必要がある、その周囲の処理対象部に対しては、少なくとも第3段階での急冷凝固スポット6を重ねた表面改質層の深さより大きくする必要がある。

【0095】次に、第2段階として欠陥10の大きさや形状を把握した後、図12(b)に示すように、レーザー光あるいはアークなどのエネルギー5を投入して、欠陥10が溶融ビード3内に含まれるように溶融処理を施し欠陥10を消失させる。

【0096】さらに、第3段階として、図12(c)に示すように溶融ビード3及びその熱影響部4を含む領域、あるいは回復熱処理した後の当該領域の表面に、急冷凝固スポット6を重ねた表面改質層を形成させる。この第2及び第3段階での施工条件は実施例1と同様であるので説明を省略する。また端部処理する必要があるときは実施例5に示した端部処理を施す。

【0097】以上の3段階(端部処理をする場合には4段階)の施工を基本とする一連の工程を施すことによって、中性子照射によって延性の低下した構造物に対しても、亀裂進展による事故を防止し、かつ施工後の経年劣化による応力腐食割れ等の亀裂発生を抑止し、構造物の健全性を長期化させることが可能である。

【0098】ここで、一連のエネルギー投入において、各段階で異なったエネルギー源を用いてもよいが、同じレーザーを用いて照射条件を変化させて一連の施工を行えば、施工時間が短縮化され、より効率的である。

【0099】(実施例8)本発明の第8の実施例として、構造物の照射脆化領域に存在する $500\mu\text{m}$ 以上の欠陥を、照射脆化の回復熱処理と欠陥部の肉盛溶接処理と表面処理によって補修する方法について説明する。照射脆化領域において鋭敏化あるいは中性子照射によるCr欠乏が生じて応力腐食割れ感受性が高くなっているとともに $500\mu\text{m}$ 以上の欠陥が存在しており、かつ中性子照射によって脆化している状態が初期状態である。

【0100】まず、欠陥10の大きさや形状を把握するために超音波あるいはX線等による非破壊探傷検査を実施する。欠陥が $500\mu\text{m}$ 以下の大きさである場合には、実施例6の施工を実施すればよい。欠陥が $500\mu\text{m}$ 以下の大きさである場合には、以下に述べる施工を行う。

【0101】まず、第1段階として図13(a)のように照射脆化の回復熱処理を行い、回復層16を形成する。熱処理条件は実施例5と同様であるが、回復層16の深さは、欠陥部近傍に対しては後の第2段階での欠陥除去のためのホール7及びその熱影響部9の深さより

19

大きくする必要があり、その周囲の処理対象部に対しては、少なくとも第3段階での表面改質部6の深さより大きくする必要がある。

【0102】次に第2段階として、図13(b)に示すように、ドリル等の機械切削あるいは放電加工等の方法によって欠陥10を含む部分に局部的にホール7を形成して欠陥を除去する。次にフィラー状の溶加材11を供給しつつレーザ光あるいはアークなどのエネルギー5を投入して溶加材11を溶融させ、上記ホール7を溶融凝固した溶加材からなる肉盛溶接金属で充填し、肉盛溶接部8を形成する。この時の施工条件は実施例2と同様であるので説明を省略する。

【0103】さらに、第3段階として、図13(c)に示すように肉盛溶接部8及びその熱影響部9を含む領域、あるいは回復熱処理した後の当該領域の表面に、急冷凝固スポット6を重ねた表面改質層を形成する。この第2及び第3段階での施工条件は実施例1と同様である。また端部処理する必要があるときは実施例5に示した端部処理を施す。

【0104】以上の3段階（端部処理をする場合には4段階）を施すことによって、中性子照射によって延性の低下した構造物に対しても、亀裂進展による事故を防止し、かつ施工後の経年劣化による応力腐食割れ等の亀裂発生を抑制し、構造物の健全性を長期化させることが可能である。

【0105】ここで、一連のエネルギー投入において、各段階で異なったエネルギー源を用いてもよいが、同じレーザを用いて照射条件を変化させて一連の施工を行えば、施工時間が短縮化され、より効率的である。

【0106】（実施例9）本発明の第9の実施例として、構造物の照射脆化領域に存在する500 $\mu$ m以上の欠陥を、照射脆化の回復熱処理とキーホール形状の溶融処理を中心とした工程によって補修する方法について説明する。照射脆化領域において鋭敏化あるいは中性子照射によるCr欠乏が生じて応力腐食割れ感受性が高くなっているとともに500 $\mu$ m以上の欠陥存在しており、かつ中性子照射によって脆化している状態が初期状態である。

【0107】まず、欠陥10の大きさや形状を把握するために超音波あるいはX線等による探傷検査を実施する。欠陥が500 $\mu$ m以下の大きさである場合には、実施例6の施工を実施すればよい。欠陥が500 $\mu$ m以下の大きさである場合には、以下に述べる施工を行う。

【0108】まず、第1段階として図14のように照射脆化の回復熱処理を行う。熱処理条件は実施例5と同様である。この時、回復層の深さは、欠陥部近傍に対しては後の第2段階での欠陥消失のための溶融ビード13の深さより大きくする必要がある。

【0109】次に第2段階として、図14(b)に示すように、レーザ光あるいはアークなどのエネルギー5を

20

投入して、欠陥10がキーホール型の溶融ビード13内に含まれるように溶融処理を施し欠陥10を消失させる。この時の施工条件は実施例3と同様である。さらに実施例3と同様に、図14(c)に示すように、キーホール型の溶融ビード13を含む領域、あるいは回復熱処理した後の当該領域の表面に、レーザ光を集光したエネルギー5を再び投入して、第3段階として表面改質処理を行って急冷凝固スポット6を重ねた表面改質層を形成すると、経年劣化に対する安全性はさらに向上する。また端部処理する必要があるときは実施例7に示した端部処理を施す。

【0110】以上の2～3段階（端部処理をする場合には3～4段階）の施工を基本とする一連の工程を施すことによって、中性子照射によって延性の低下した構造物に対しても、亀裂進展による事故を防止し、かつ施工後の経年劣化による応力腐食割れ等の亀裂発生を抑制し、構造物の健全性を長期化させることが可能である。

【0111】ここで、一連のエネルギー投入において、各段階で異なったエネルギー源を用いてもよいが、同じレーザを用いて照射条件を変化させて一連の施工を行えば、施工時間が短縮化され、より効率的である。

【0112】（実施例10）本発明の第10の実施例として、構造物の照射脆化領域に存在する500 $\mu$ m以上の欠陥を、照射脆化の回復熱処理と欠陥の封じ込め処理を中心とした工程によって補修する方法について説明する。照射脆化領域において鋭敏化あるいは中性子照射によるCr欠乏が生じて応力腐食割れ感受性が高くなっているとともに500 $\mu$ m以上の欠陥が存在しており、かつ中性子照射によって脆化している状態が初期状態である。

【0113】まず、欠陥10の大きさや形状を把握するために超音波あるいはX線等による探傷検査を実施する。欠陥が500 $\mu$ m以下の大きさである場合には、実施例6の施工を実施すればよい。欠陥が500 $\mu$ m以下の大きさである場合には、以下に述べる施工を行う。

【0114】まず、第1段階として照射脆化の回復熱処理を行い、図15(a)のように回復層16を形成する。熱処理条件は実施例5と同様であるので説明を省略する。この時、形成される回復層16の深さは、次の段階で急冷凝固スポット6を重ねて形成する表面改質層の深さより大きくする（500 $\mu$ m以上）必要がある。

【0115】次に第2段階として、図15(b)に示すように、欠陥10を含む領域、あるいは回復熱処理した後の当該領域の表面にレーザ光あるいはアークなどのエネルギー5を投入して、表面改質層16の表面部を融点以上に加熱した後急冷し、急冷凝固スポット6を重ねた表面改質層を形成する。この表面改質層によって、欠陥10の入り口が封じ込められる。この時の施工条件は実施例4と同様であるので説明を省略する。また、回復層16の端部を処理する必要があるときは実施例7に示し

た端部処理を施す。

【0116】以上の2段階（端部処理をする場合には3段階）の施工を基本とする一連の工程を施すことによって、中性子照射によって延性の低下した構造物に発生した欠陥10を封じ込めることができるので、欠陥10の先端が炉水に溶解することがなく、欠陥10の進展を止めることができる。したがって、亀裂進展による事故を防止し、かつ施工後の経年劣化による応力腐食割れ等の亀裂発生を抑制し、構造物の健全性を長期化させることが可能である。

【0117】ここで、表面改質層16の形成のためのエネルギー5の投入と、急冷凝固スポット6を形成するためのエネルギー5の投入とにおいて、異なったエネルギー源を用いてもよいが、同じレーザーを用いて照射条件を変化させて一連の施工を行えば、施工時間が短縮化され、より効率的である。

【0118】（実施例11）次に、本発明の実施例11として、上述の実施例1から実施例10に示した原子炉炉内の構造物の補修方法または予防保全方法を実施するための装置について図16および図23を用いて説明する。

【0119】本実施例の装置の構成について説明する。本実施例の装置は、原子炉炉内に導入されるロボット部分と、原子炉炉外でロボット部分を駆動および制御する部分とを備えている。ロボット部分は、図16のように、第1アーム26と、第1アームに連結された第2アーム27と、第2アームの先端部に取り付けられたヘッド28とを備えている。第1アーム26と第2アーム27との連結部51、および、第2アーム27とヘッド28との連結部は、それぞれ、連結角度を変えることのできる可動な連結部である。第1アーム26の端部には、これら連結部51等を駆動するための駆動装置29が取り付けられている。

【0120】ヘッド28について、図23を用いてさらに説明する。ヘッド28は、補修または予防保全すべき構造物に対してエネルギーを出射する部分である。例えば、ヘッド28として、高周波を照射するためのヘッドや、TIG等のトーチや、レーザー光を出射する光学系等のヘッドの何れかを取り付けることができるが、本実施例では、レーザー光を出射する光学系を取り付けている。

【0121】原子炉炉外には、レーザー発振器31と、レーザー発振器31の電源38と、レーザー発振器31を冷却するための冷却系39が配置されている。レーザー発振器31と、ヘッド28との間には、光ファイバ33が配置され、レーザー発振器31から出射されたレーザー光をヘッド28まで導いている。原子炉炉内では、光ファイバ33は、第1アーム26および第2アーム27の内部を引き回されている。レーザー発振器31と光ファイバ33との間には、レーザー光を光ファイバ33に入射させるための入射光学系32が配置されている。

【0122】また、電源38には、電源38のレーザー発振器38への出力を制御するための制御系34が接続されている。制御系34とヘッド28との間には、ヘッド28が出射したレーザー光の一部を制御系34まで導くためのモニタファイバ35が配置されている。制御系34は、モニタファイバ35が導いた光の強度から、ヘッド28が出射している光の強度を検出し、検出結果および施工対象部の処理条件に応じて電源38がレーザー発振器31に供給する電力を制御する。

【0123】また、ヘッド28には、炉外に配置されたガスボンベ36に接続されたガスホース37の端部が配置されている。ガスホース37の端部からは、ガスが噴出され、補修または予防保全すべき部位の周囲をガス雰囲気保つ。ガスホース37は、炉内においては、第1アーム26および第2アーム27の内部を引き回されている。

【0124】次に、本実施例において、補修または予防保全を行う原子炉の構成について簡単に説明する。図16のように、原子炉压力容器19内には、シュラウド20と、シュラウドサポートレグ22と、シュラウドサポートプレート23、上部格子板24、炉心支持板25が配置されている。その他の原子炉内部機器である、燃料棒、制御棒、蒸気乾燥器、気水分離器、シュラウドヘッド、燃料集合体等が実際には配置されているが、補修または予防保全を行うために取り外してある。また、炉水も予め抜いておく。本実施例の装置は、シュラウド20の補修を行う。

【0125】つぎに、本実施例の装置を用いて、軽水炉炉内のシュラウドを補修または予防保全する方法を説明する。シュラウドの補修または予防保全する施工対象部は、 $2 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ （中性子エネルギー $> 0.1 \text{ MeV}$ ）あるいは $4 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ （中性子エネルギー $> 1 \text{ MeV}$ ）以上の高い線量の中性子照射（約4dpa以上）を受けており、中性子照射による照射脆化の影響を考慮する必要がある。また、処理対象部は、溶接熱影響部等のように、溶接の際発生する引張残留応力といった応力因子と、中性子照射の影響で境界でのCr濃度の局所的な低下、あるいは、結晶粒界におけるCr炭化物の析出のような材料劣化とが複合しており、応力腐食割れ感受性が高い。

【0126】まず、本実施例の装置のうちロボットの部分を原子炉炉内に導入する。これをさらに説明する。駆動装置29は、連結部51等を動かし、第2アーム27およびヘッド28を第1アーム26に重ねるように折たたみ、ロボットをシュラウド20の中心位置から上部格子板24を通過させる。通過後、駆動装置29は第2アーム27やヘッド28を開き、かつ、施工対象部にアクセス可能なように位置付ける。

【0127】つぎに、ガスボンベ36からガスホース37を介して、施工対象部の周囲をガスを吹き付けて、ガ



ス雰囲気にする。この状態で、レーザ発振器31が発したレーザ光を光ファイバ33でヘッドまで導き、施工対象部を熱処理することにより補修または予防保全を行う。

【0128】具体的な施工条件は、実施例5から10で述べた補修方法または予防保全方法を用いる。ただし、本実施例では、ヘッド28としてレーザ光を出射する光学系のヘッドを取り付けているので、実施例5から10では高周波熱源を用いて行った第1段階の照射脆化の回復熱処理を、レーザ光で処理する。もちろん、ヘッド28として、高周波を照射するためのヘッドを取り付けられ、高周波で照射脆化の回復熱処理を行うことができる。ここで、第1段階での回復熱処理施工時に用いる熱源がレーザの場合は第2段階以降の工程においてヘッド28を交換する必要は無いが、回復熱処理施工時に高周波等の熱源を用いた場合は、第2段階以降の施工に当たって、一端ロケットを炉外に取り出し、ヘッド28をレーザ、TIG等の加熱源に交換する必要がある。具体的な、施工方法や、処理対象部の表面に酸化膜が付着している場合の表面グランド等の処理を必要に応じて施すことについては、実施例1～10にて述べた通りであるので、説明を省略する。

【0129】以上のように、本実施例の装置を用いて補修または予防保全の工程を施すことによって、中性子照射によって延性の低下したシュラウドについて、欠陥の発生の予防、ならびに、発生した亀裂状の欠陥の進展を防止することができる。これにより、シュラウドの応力腐食割れ破壊あるいは亀裂の貫通による炉水漏洩等の事故を防止すると同時に、施工後の経年劣化による応力腐食割れ等の発生を抑止し、構造物の健全性を長期化させることが可能である。

【0130】本実施例では炉内構造物への適用の一例として、シュラウドの内面施工について概略を説明したが、本発明では中性子照射による照射脆化の有無にかかわらず、オーステナイト系ステンレス鋼やインコネル製の全ての炉内構造物に対して適用が可能であり、健全性が長期化された軽水がとすることができる。

【0131】

【発明の効果】本発明によれば、構造物の欠陥の補修を行うとともに、補修部の応力腐食割れ感受性を低く抑えることができるため、経年劣化を防止することができ、施工後の原子炉プラントの健全性を長期化させるのに効果が有る。

【図面の簡単な説明】

【図1】(a)本発明の第1の実施例の補修方法によって補修された構造物の構成を示す断面図。(b)本発明の第2の実施例の補修方法によって補修された構造物の構成を示す断面図。

【図2】本発明の第1から第4の実施例で補修を行う構造物の補修前の欠陥の状態を示す断面図。

【図3】(a)本発明の第1の実施例の補修方法によって溶解処理を施した構造物の断面図。(b)本発明の第2の実施例の補修方法によって肉盛溶接処理を施した構造物の断面図。

【図4】中性子等の照射により脆化し、さらに亀裂状の欠陥が生じた構造物の断面図。

【図5】(a)図4の構造物を従来の溶解処理によって補修した場合の断面図。(b)図4の構造物を従来の溶接肉盛によって補修した場合の断面図。

【図6】(a)本発明の第3の実施例の補修方法によってキーホール形状の溶解ビードを形成した構造物の断面図。(c)本発明の第3の実施例の補修方法によって補修された構造物の構成を示す断面図。

【図7】本発明の第4の実施例の補修方法によって補修された構造物の構成を示す断面図。

【図8】(a)本発明の第5の実施例の予防保全方法をおこなう前の構造物の状態を示す断面図。(b)本発明の第6から第10の実施例で補修を行う構造物の欠陥の状態を示す断面図。

【図9】(a)本発明の第5の実施例の予防保全方法によって、照射脆化の回復熱処理層を形成した構造物の断面図。(b)本発明の第5の実施例の予防保全方法によって予防保全された構造物の断面図。

【図10】(a)本発明の第5の実施例の予防保全方法によって予防保全された構造物の断面図。(b)本発明の第5の実施例の予防保全方法によって予防保全された構造物にさらに端部処理を施した場合の構造物の断面図。

【図11】(a)本発明の第6の実施例の補修方法によって照射脆化の回復熱処理層を形成した構造物の断面図。(b)本発明の第6の実施例の補修方法によって補修された構造物の断面図。

【図12】本発明の第7の実施例の補修方法によって、(a)照射脆化の回復熱処理層を形成した構造物の断面図。(b)照射脆化の回復熱処理層に溶解処理を施した構造物の断面図。(c)補修された構造物の断面図。

【図13】本発明の第8の実施例の補修方法によって、(a)照射脆化の回復熱処理層を形成した構造物の断面図。(b)照射脆化の回復熱処理層に溶接肉盛処理を施した構造物の断面図。(c)補修された構造物の断面図。

【図14】本発明の第9の実施例の補修方法によって、(a)照射脆化の回復熱処理層を形成した構造物の断面図。(b)照射脆化の回復熱処理層にキーホール形状の溶解ビードを形成した構造物の断面図。(c)補修された構造物の断面図。

【図15】本発明の第10の実施例の補修方法によって、(a)照射脆化の回復熱処理層を形成した構造物の断面図。(b)補修された構造物の断面図。

【図16】本発明の第11の実施例の装置の構成を示す



ブロック図。

【図17】本発明の第1の実施例において、急冷凝固スポット6を形成する際の入熱量と施工後の経年劣化度との関係を示すグラフ。

【図18】本発明の第3の実施例の補修方法においてキーホール状の熔融ビードを形成するための入熱量および出力密度の範囲を示すグラフ。

【図19】本発明の第5の実施例の予防保全方法において(a)照射脆化を回復させるための熱処理に適した温度と保持時間の関係を示すグラフ。(b)熱処理によって鋭敏化が生じる温度範囲と保持時間の関係を示すグラフ。(c)材料の炭素含有量が高い場合の照射脆化を回復させるための熱処理に適した温度と保持時間の関係を示すグラフ。

【図20】本発明の第1の実施例において、急冷凝固スポット6およびその熱影響部の温度と時間との関係を示すグラフ。

【図21】本発明の第1の実施例において、急冷凝固スポット6を形成する順序を示す説明図。

【図22】本発明の第1の実施例において、急冷凝固ス

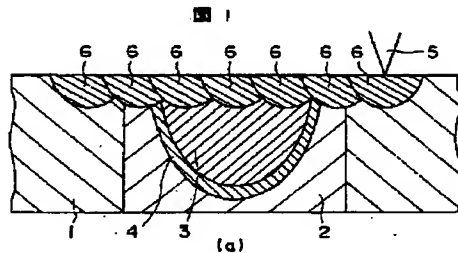
ポット6を形成する順序を示す説明図。

【図23】図16の装置のヘッド部の構成を示すための斜視図。

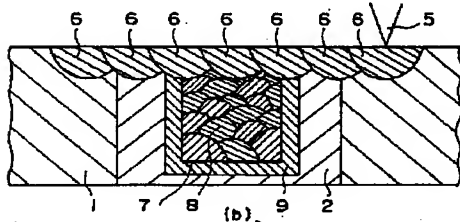
【符号の説明】

1…炉内構造物、2…鋭敏化部、3…熔融ビード、4…熔融処理における熱影響部、5…熱エネルギー、6…急冷凝固スポット、7…ホール、8…肉盛溶接部、9…肉盛溶接時の熱影響部、10、14…欠陥、11…フィラー状の溶加材、12…照射脆化部、13…キーホール形状の溶融部、15…加熱源、16…回復層、17…未表面処理の回復層部分、18…表面溶体化層、19…圧力容器、20…シュラウド、21…シュラウド溶接部、22…シュラウドサポート、23…シュラウドサポートレグ、24…上部格子板、25…炉心支持板、26…第1アーム、27…第2アーム、28…ヘッド、29…駆動装置、31…レーザー発振器、32…入射光学系、33…光ファイバー、34…制御系、35…モニタファイバー、36…ガスポンプ、37…ガスホース、38…電源、39…冷却系。

【図1】

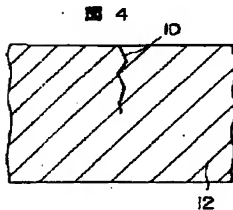


(a)

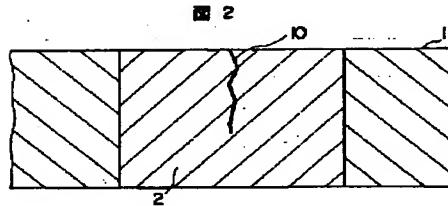


(b)

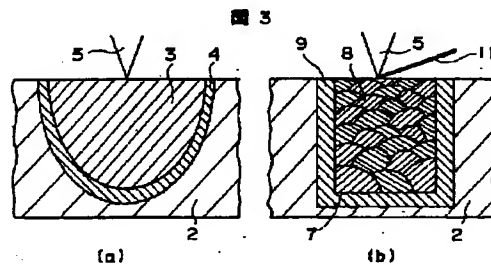
【図4】



【図2】



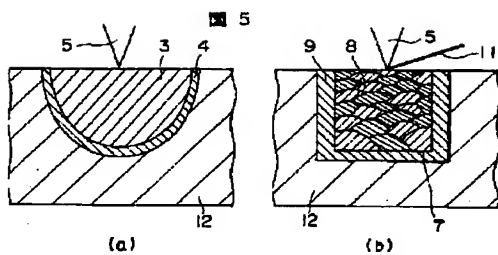
【図3】



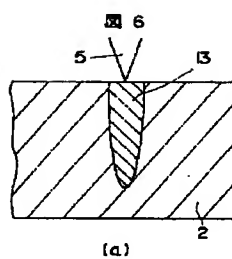
(a)

(b)

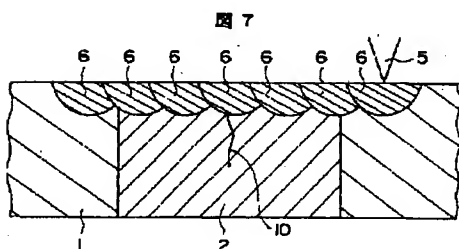
【图5】



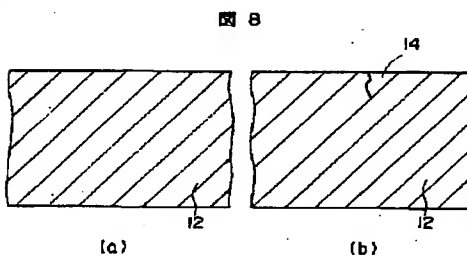
【图6】



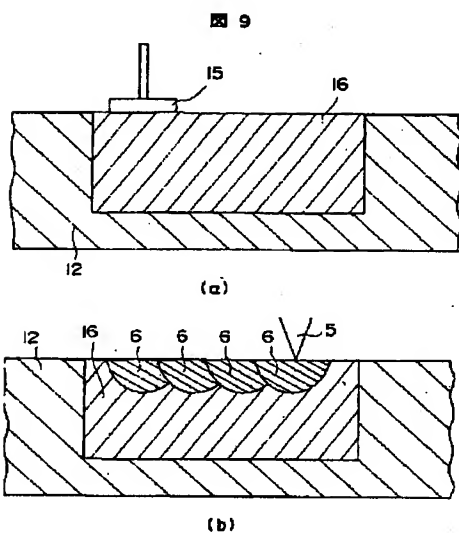
【图7】



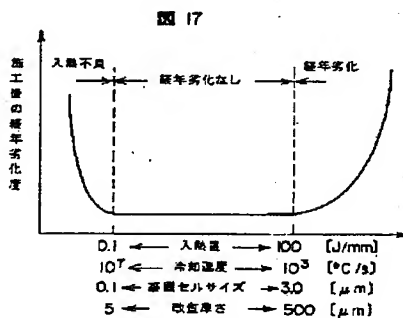
【圖 8】



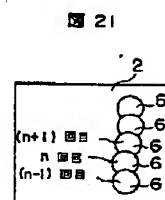
【图9】



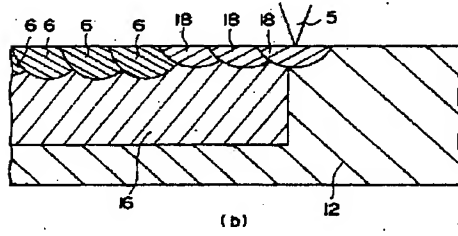
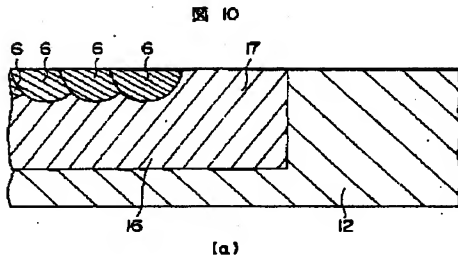
【图 17】



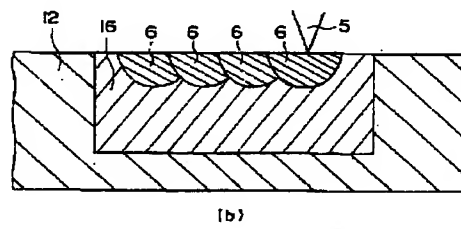
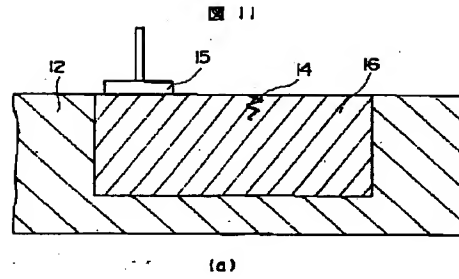
【图 2 1】



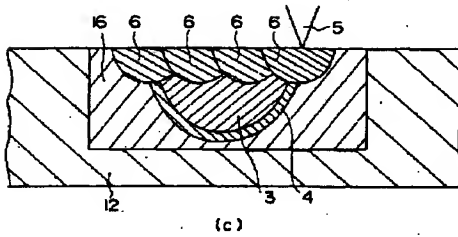
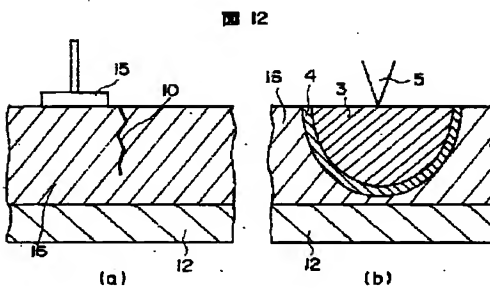
【図10】



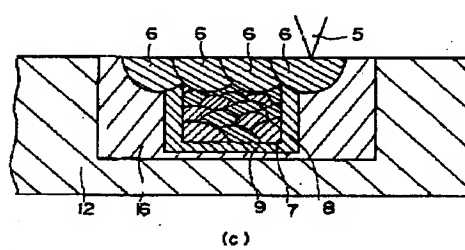
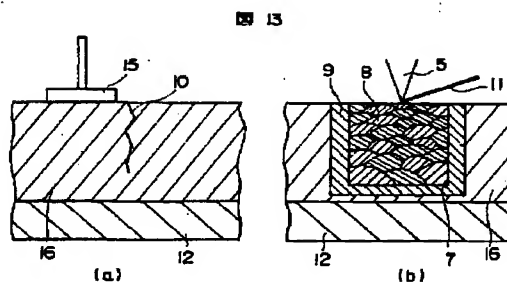
【図11】



【図12】

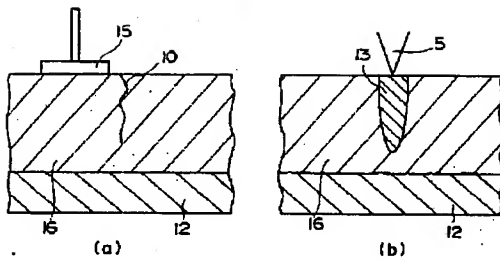


【図13】



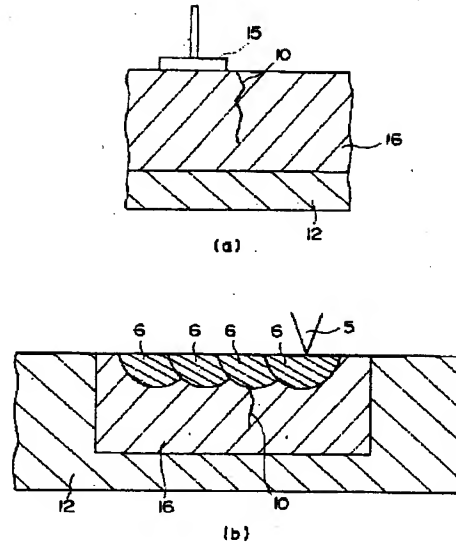
【図14】

図14



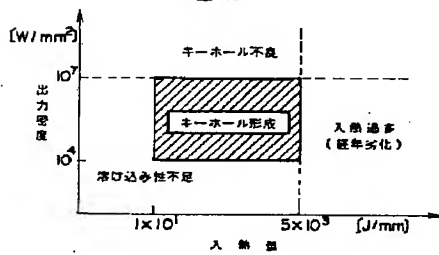
【図15】

図15



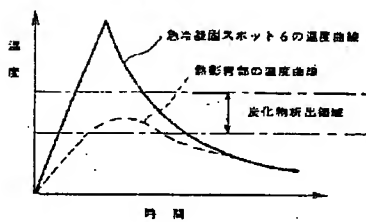
【図18】

図18



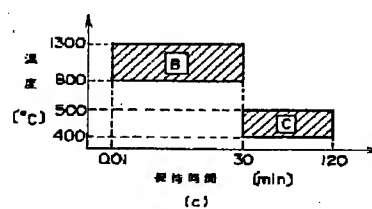
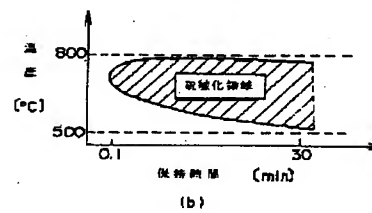
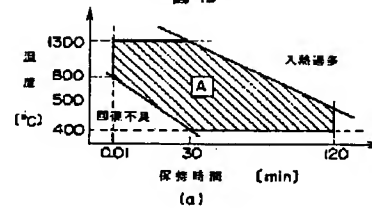
【図20】

図20



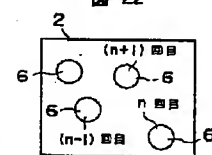
【図19】

図19



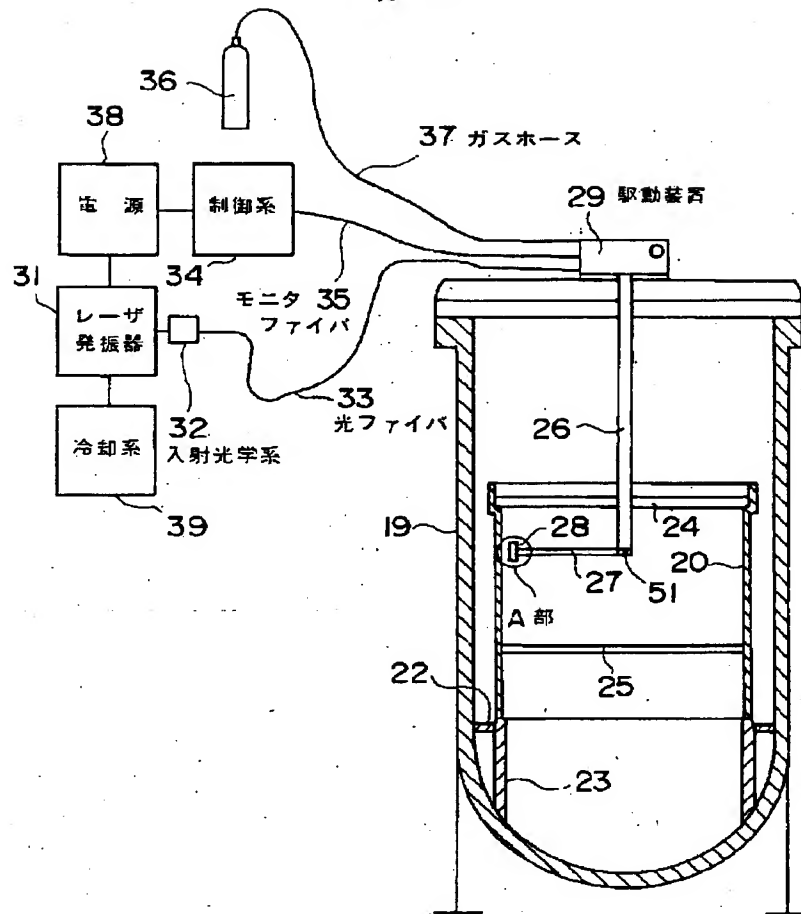
【図22】

図22



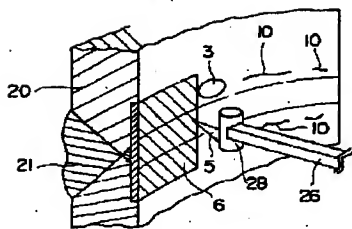
【図16】

図 16



【図23】

図 23



A 部詳細

## 【手続補正書】

【提出日】平成 6 年 4 月 19 日

## 【手続補正 1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】図 6

【補正方法】変更

## 【補正内容】

【図 6】(a) 本発明の第 3 の実施例の補修方法によってキーホール形状の溶融ビードを形成した構造物の断面図。(b) 本発明の第 3 の実施例の補修方法によって補修された構造物の構成を示す断面図。

## フロントページの続き

(72)発明者 青野 泰久

茨城県日立市大みか町七丁目 1 番 1 号 株式会社日立製作所日立研究所内

(72)発明者 松本 俊美

茨城県日立市大みか町七丁目 1 番 1 号 株式会社日立製作所日立研究所内

(72)発明者 坂本 征彦

茨城県日立市大みか町七丁目 1 番 1 号 株式会社日立製作所日立研究所内

(72)発明者 林 英策

茨城県日立市幸町三丁目 1 番 1 号 株式会社日立製作所日立工場内

(72)発明者 玉井 康方

茨城県日立市幸町三丁目 1 番 1 号 株式会社日立製作所日立工場内

(72)発明者 辻村 浩

茨城県日立市幸町三丁目 1 番 1 号 株式会社日立製作所日立工場内